

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2024.11.058

废弃口罩改性沥青流变性能及储存稳定性

刘文昶¹, 林宏伟²

(1.上海奉贤建设发展集团有限公司,上海市 201400; 2.同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室,上海市 201804)

摘要:为实现废弃口罩的循环利用,分别将 2%、4%、6% 口罩碎片加入到 70# 基质沥青中,并研究废弃口罩对沥青使用性能的影响。结果表明:所用口罩为聚丙烯高分子材料,口罩改性沥青主要是物理改性,没有新的官能团产生。随着口罩添加量的增加,沥青的软化点、复数模量、车辙因子增大,针入度及相位角下降,沥青的高温性能得以增强。然而,添加口罩后,沥青的蠕变劲度增大,蠕变速率及蠕变速率劲度比降低,沥青低温抗裂性能劣化。与 70# 沥青相比,口罩改性沥青的疲劳寿命在 2.5% 及 5% 应变水平下至少提升了 14.1%、4.3%。改性沥青的相均匀性随口罩添加量增加变差,改性沥青的相分离趋势愈发显著,推荐口罩添加量为 4%。

关键词: 道路工程; 废弃口罩; 改性沥青; 流变性能; 疲劳性能; 存储稳定性

中图分类号: U414

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)11-0247-06

0 引言

为了有效应对新冠疫情蔓延,佩戴口罩已经成为阻断病毒传播、实现自我防护的普遍措施^[1]。据报道,全世界每个月大约有 1 290 亿个口罩被丢弃^[2]。倘若这些口罩垃圾处置不当,随意废弃很有可能形成病毒二次传播,同时造成河流和海洋等水体环境污染,最终通过食物链进入动物和人体^[3]。因此,迫切需要多学科交叉合作提出既满足防疫需求又绿色环保的可持续解决方案。

从循环经济的角度而言,将废弃口罩进行重复再利用,不仅可以减少垃圾填埋量,还可以节约自然资源,达到低碳环保的目的。Tang 等^[4]建议将经过消毒的废弃医疗用品应用于岩土工程建设中。Rehman 等^[5]创造性地将废弃口罩用于黏土处治,并取得良好的工程效果。Kilmartin-Lynch 等^[6]探索了废弃口罩在水泥混凝土中的应用,结果表明,掺加 0.2% 废弃口罩可有效提升水泥混凝土的力学强度。此外,Saberian 等^[7]研究发现,将一定比例的口罩破碎料添加到再生混合料中,可提高混合料的力学强度、延性和柔韧性。综上,将废弃口罩的处置与土木工程建设相结合的方案是可行的。

此外,一次性口罩作为一种高分子复合塑料,含有大量高分子材料,诸如聚氨酯、聚碳酸酯、聚丙烯

(PP)、聚苯乙烯、聚丙烯腈、聚乙烯或聚酯^[8]。高温作用下,高分子材料在沥青中充分溶解膨胀,与沥青组分反应,形成性能更加优异的改性沥青。周超等^[9]研究废旧 PP 与 SBR 对改性沥青流变性能的影响,发现通过 SBR/PP 配合比设计可有效提高沥青的抗蠕变恢复性能。李春歌等^[10]研究生活废旧塑料对基质沥青性能的影响,认为废弃塑料的掺入可提高基质的高温性能。Vila 等^[11]认为将废弃聚苯乙烯塑料掺加到沥青混合料中,可有效增强沥青混合料的疲劳性能。此外,Almeida 等^[12]研究发现,将废弃塑料薄膜加入温拌沥青混合料中,可有效提高其刚度、抗水损性能、施工和易性。综上所述,目前有关废弃口罩改性沥青的研究尚未有报道,现有废弃塑料在道路工程中的应用为废弃口罩在沥青及沥青混合料中的应用提供了有力借鉴。

鉴于此,通过室内试验评估不同废弃口罩添加量对基质沥青常规物理性能、高低流变性能、疲劳性能及储存稳定性的影响,研究成果对于实现废弃口罩循环再利用具有参考意义。

1 试验方案

1.1 原材料

(1) 基质沥青

沥青采用韩国 SK 公司生产的 70# 道路石油沥青,性能分级温度为 PG64-22,技术指标见表 1。

(2) 口罩

废弃一次性口罩的物理力学性质见表 2。一次性

收稿日期: 2024-07-08

作者简介: 刘文昶(1992—),男,博士,工程师,从事道路工程材料开发工作。

表 1 70# 沥青技术性质

指标	25℃针入度 /0.1 mm	软化点 /℃	15℃延度 /cm
实测值	70	48.4	>100
规范值	60~80	≥46	≥100

口罩由熔喷布、无纺布、口罩带、金属条组成。其中,外层和内层均采用无纺布,中层采用熔喷布。在口罩破碎处理过程中,需要将金属条和口罩带取出,再使用粉碎机进行初步粉碎,最后使用剪刀二次加工,确保将其粉碎成不超过 0.3 cm 的宽度和 1 cm 的长度的任意形状和大小的口罩碎片,如图 1 所示。

表 2 废弃口罩的物理性质

指标	测试值	指标	测试值
比重	0.96	抗拉强度 /MPa	3.70
熔点 /℃	160	断裂强度 /MPa	4.10
24 h 吸水率 /%	7.9	断裂伸长率 /%	117.2

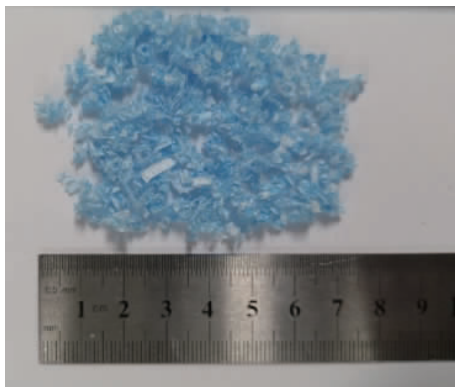


图 1 口罩碎片

1.2 口罩改性沥青制备

首先,将原样沥青放入干燥箱,进行 160 ℃ 高温加热。其次,将 2%、4%和 6%口罩破碎料加入到基质沥青中。再次,采用高速旋转剪切机以 3 500 r/min 转速剪切搅拌 45 min,直至改性沥青表面无明显颗粒,确保破碎口罩在沥青中分布均匀。

1.3 试验方法

采用凝胶渗透色谱仪测定所用口罩的平均分子量和分子量分布,流动相溶剂采用 1,2,4-三氯苯。通过红外光谱(FTIR)研究废弃口罩及其对沥青官能团形成及变化的影响,光谱范围为 4 000 ~ 500 cm^{-1} 。

根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中 T 0604—2011、T 0606—2011、T 0628—2011、T 0627—2011 对口罩改性沥青进行针入度试验、软化点试验、动态剪切流变(DSR)试验、弯曲梁流变试验(BBR)试验,评价废弃口罩对改性沥青高低温性能的影响。参考 AASHTO TP101—

14,选取 RTFOT 老化沥青样品进行线性振幅扫描(LAS)试验,评价其抗疲劳性能。此外,通过聚合物离析试验及荧光显微镜试验分别从宏观和微观角度评价口罩与沥青的相容性和存储稳定性。

2 试验结果与分析

2.1 废弃口罩及其改性沥青化学组分

2.1.1 凝胶色谱试验

口罩材料的分子量及其分布结果见图 2 及表 3。三层材料的分子量及其分布相似,其中重均分子量及峰位分子量均超过 50 000,数均分子量超过 20 000,因此三层材料均为高分子聚合材料。其中,内外层材料及中间层材料的分子量分布指数为 2.25、2.20、2.45,内外层材料的分子量分布较中层材料的分子量分布较窄。

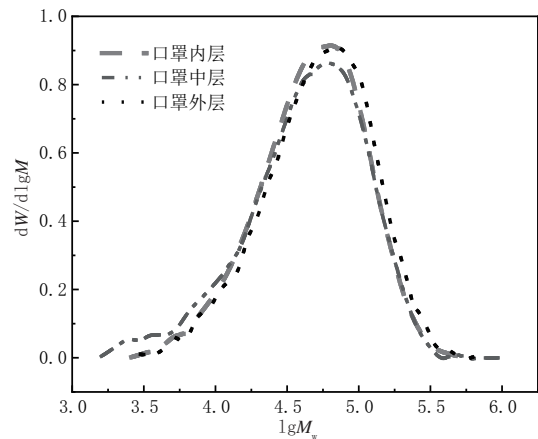


图 2 废弃口罩分子量分布曲线

表 3 废弃口罩分子量及其分布

参数	内层材料	中层材料	外层材料
重均分子量 M_w	58 342	53 111	54 686
数均分子量 M_n	26 459	21 732	25 157
黏均分子量 M_v	53 674	48 489	50 204
峰位分子量 M_p	54 635	55 530	51 197
分布指数 D	2.20	2.44	2.17

2.1.2 红外光谱试验

口罩三层不同材料及其改性沥青的红外光谱结果见图 3。由口罩材料的红外谱图知,在 2 960、2 870 cm^{-1} 处分别为 $-\text{CH}_3$ 反对称伸缩及对称伸缩振动峰,2 920、2 850 cm^{-1} 分别为 $-\text{CH}_2$ 反对称伸缩及对称伸缩振动峰,1 453 cm^{-1} 处存在 $-\text{CH}_3$ 的反对称面内伸缩振动峰,1 372 cm^{-1} 处出现 $-\text{CH}_3$ 对称面内对称弯曲振动峰,1 163、973、902、841 cm^{-1} 处均出现 $-\text{CH}_3$ 外面摇摆振动峰^[13]。口罩三层材料光谱图一致,同时在 2 960、2 920 cm^{-1} 等多个不同波数均出

现吸收峰,与聚丙烯的标准红外光谱基本一致。因此,研究所用口罩的成分均为聚丙烯材料。

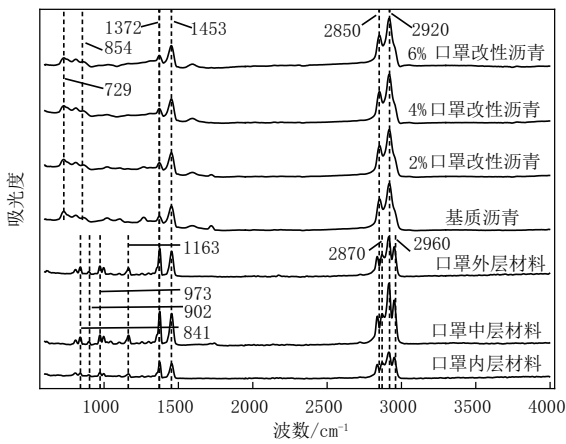


图3 红外光谱图

由沥青的红外谱图知,所有沥青样品在 2 920、2 850、1 453、1 372 cm^{-1} 附近处存在明显的伸缩振动峰,其他波数范围内的吸收峰均相似。综上,基质沥青在添加口罩碎片后未观察到明显的化学反应,没有发现新化学键的生成与断裂。除峰强有所差异外,不同沥青样品的各吸收峰所出现的位置基本一样,表明不同沥青样品的官能团基本一致,但是官能团数量不同,因此废弃口罩改性沥青主要是一个物理过程。

2.2 废弃口罩对改性沥青性能的影响

2.2.1 软化点及针入度

针入度及软化点试验结果见图4。随着口罩破碎料添加量的增加,软化点明显升高,但是沥青的针入度明显降低。与70#沥青相比,采用不同口罩破碎料改性沥青的针入度的降低量大于10%,软化点升高量大于6%。由废弃口罩红外光谱可知,废弃口罩主要成分为PP。与基质沥青相比,PP在高温下具有较好的热稳定性,将PP引入沥青中可以增加沥青的热稳定性^[14]。

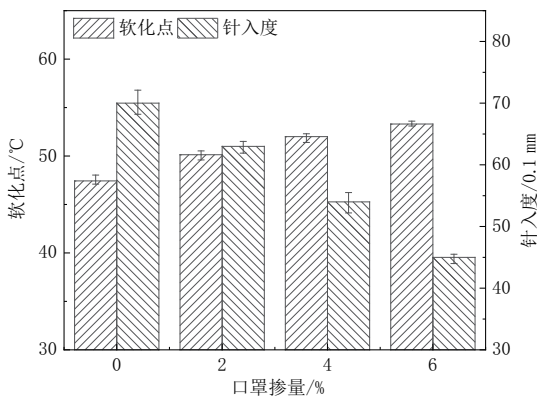
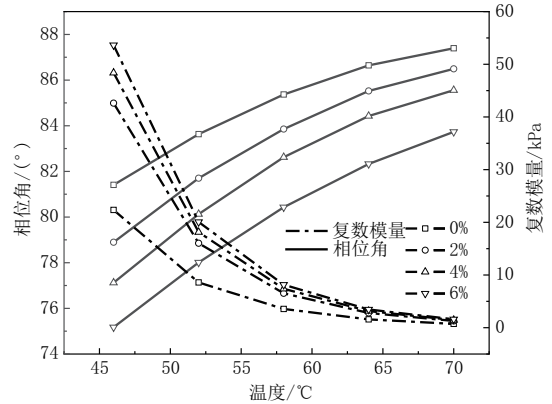


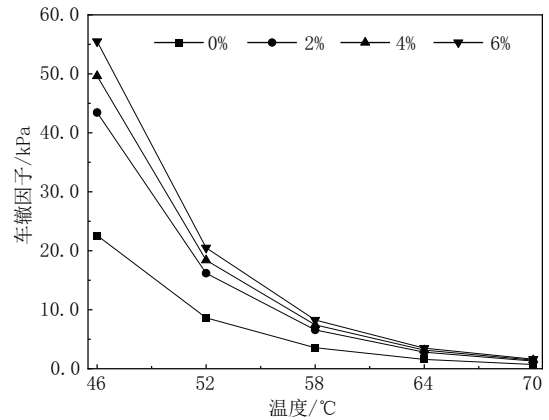
图4 软化点及针入度试验结果

2.2.2 高温流变性能

DSR 试验结果见图5。由相位角曲线可知,与原样沥青相比,相同温度下口罩改性沥青的相位角更小,沥青在高温弹性行为增强。这是由于废弃口罩作为高分子材料,可增加沥青的弹性部分比例,从而改善沥青的高温黏滞性。



(a)相位角及复数模量



(b)车辙因子

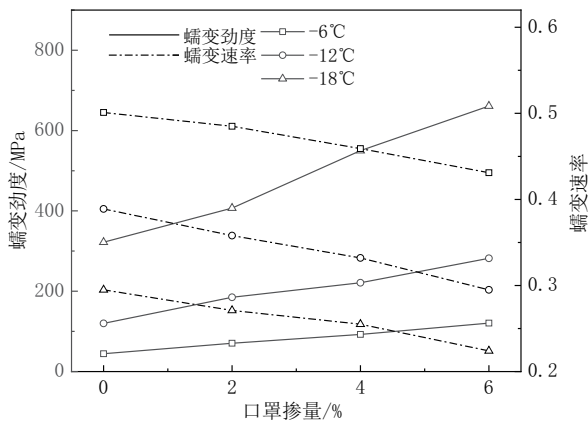
图5 DSR 试验结果

由复数模量及车辙因子曲线可知,与原样沥青相比,相同温度下口罩改性沥青的复数模量及车辙因子更大,高温流变性能显著改善^[15]。结果表明,口罩添加后,沥青的抵抗外界荷载作用的能力有效提升。这是由于废弃PP材料具有长链结构,可促进PP与沥青的分子交联及相互作用,进而提高沥青的刚度和强度,主要表现为沥青复数模量增大^[16]。同时,PP的分子量大,在沥青中掺入PP材料可有效提高沥青结合料的分子量。沥青结合料分子量的增大有利于加强沥青结合料内的分子间作用力,改善沥青的内聚力和黏附性能。

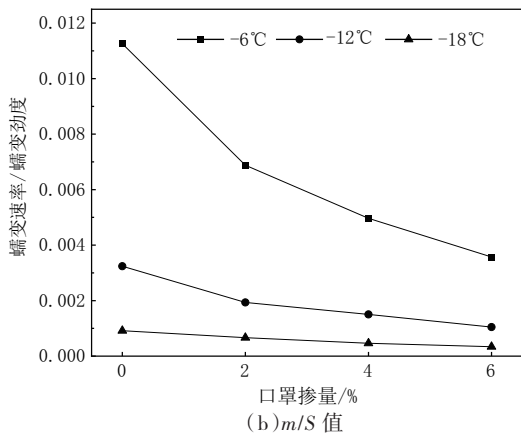
2.2.3 低温流变性能

BBR 试验结果见图6。随温度下降,沥青的蠕变劲度S增大,蠕变速率m及蠕变速率劲度比m/S值则呈相反趋势变化^[17]。此外,相同温度下,蠕变劲度S

随着口罩破碎料添加量的增加而增大,而蠕变速率 m 及蠕变速率劲度比 m/S 值随之下降。结果表明,口罩添加后,沥青的低温柔韧性及低温应力松弛性能明显降低。这是由于废弃 PP 在 160 °C 旋转剪切作用下充分吸收沥青的轻质组分,并将低分子量部分释放到沥青中,使沥青的流动性下降,降低了沥青的低温柔韧性和抗裂性能。随着 PP 添加量增加,PP 颗粒在沥青中的分布愈发不均匀,使沥青结合料的低温流变性能逐渐劣化^[18]。



(a) 蠕变劲度 S 及蠕变速率 m



(b) m/S 值

图6 BBR 试验结果

2.2.4 疲劳性能

基于 LAS 试验的各沥青的损伤特征曲线见图 7。沥青疲劳方程参数见表 4。其中,参数 A 越大,沥青在加载周期中承受累积损伤时保持其完整性的能力越强;参数 B 越小,沥青对应变水平变化的敏感性越好^[19]。分析可知,基质沥青的参数 A、B 均最小,且两者均随着口罩添加量增加而逐渐增大。结果表明,口罩改性沥青在循环荷载作用下的材料完整性较好,但是疲劳寿命随着应变水平的增加下降速率增大。结合后述的荧光图像可知,PP 材料在高温剪切作用下逐渐熔融成小颗粒均布于沥青中,与沥青质形成两相结构。因此,随着应变水平增加,沥青-PP 颗粒结合处首先出现破坏。

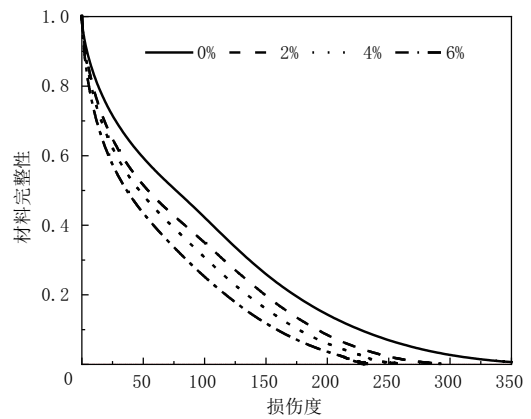


图7 损伤特征曲线

表4 疲劳方程参数

口罩掺量	0%	2%	4%	6%
参数 A	243 073	312 481	392 787	481 816
参数 B	2.89	3.02	3.13	3.24

不同应变水平的沥青预估疲劳寿命见图 8。随着口罩破碎料添加量的增加,沥青的疲劳寿命显著增加。这是由于口罩颗粒吸附基质沥青发生溶胀作用,且 PP 的长链结构与沥青中的分子相互作用,缠绕形成聚合物网络,从而提高了沥青的抗疲劳性能。

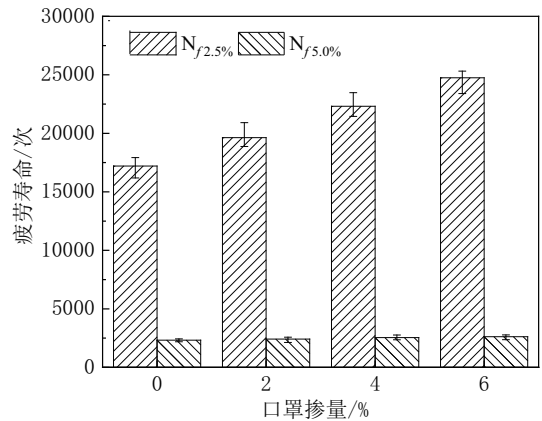


图8 不同应变水平下沥青疲劳寿命结果

2.2.5 相容性评价

聚合物改性沥青的相容性对于其性能稳定性至关重要。试验通过离析试验及荧光图像观察对此进行综合评价。离析试验结果及微观图像分别见图 9、图 10。由图 9 可知,铝管顶部样品的软化点和车辙因子 $G^*/\sin \delta$ 表现优于底部样品。不同口罩破碎料含量的改性沥青均表现出比基质沥青更高的软化点差值、 $G^*/\sin \delta$ 差值及离析指数。这是由于口罩和沥青的密度不同,口罩颗粒在布朗运动的作用下形成聚集,并向样品顶部移动,导致口罩颗粒与沥青分离。此外,软化点差值、 $G^*/\sin \delta$ 差值及离析指数随着口罩添加量增加而增大。这是由于随着口罩破碎料含

量的增加,口罩破碎料颗粒在沥青相中的分散效果逐渐变差。一般而言,当聚合物改性沥青软化点差值大于3℃时,混合物就会出现明显的离析现象^[20]。结合图9(c)可知,当口罩添加量超过4%,改性沥青出现较为严重的离析问题。因此,需要控制口罩的掺入比例,以保证口罩改性沥青的均匀性和存储稳定性。

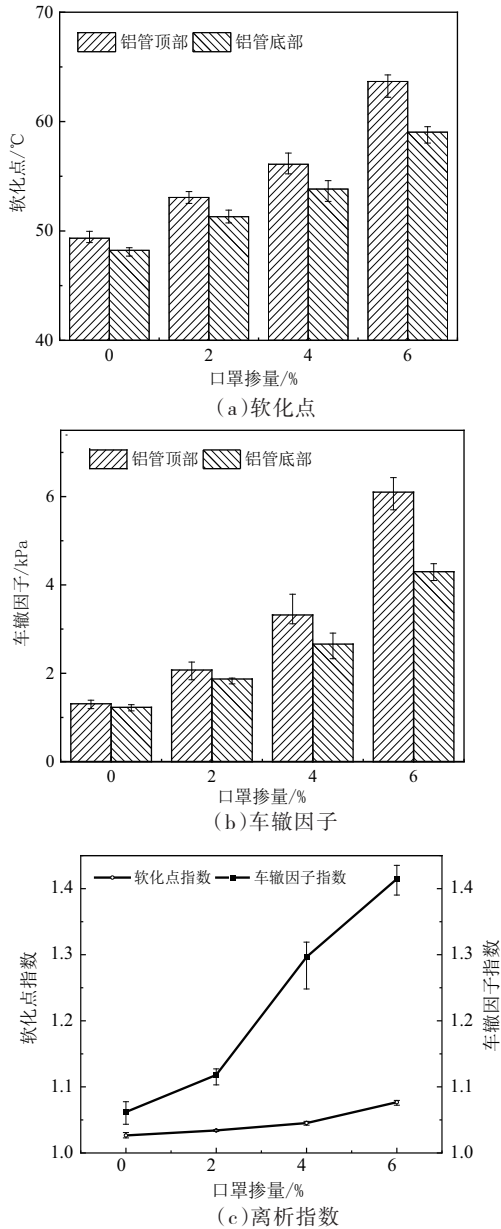


图9 离析试验结果

图10(a)为基质沥青,图像示出均匀的低荧光,表明沥青结合料具有均匀的微观结构,没有发生相分离。图10(b)、(c)显示聚合物相在沥青相中呈海岛状均匀分布(典型尺寸<50 μm)。同时,废弃口罩在高速旋转剪切搅拌作用下成颗粒状均布于沥青相中,同时吸收轻质组分充分溶胀作用,但并未完全溶解于沥青中,实现与沥青相互紧密连接,降低沥青的流动性。图10(d)显示,当口罩添加量增加至6%时,

口罩颗粒在沥青相中分散愈发不均匀。这意味着宏观相更易于分离,可能导致改性沥青黏结剂面临着存储不稳定的问题,与离析试验结果一致^[21]。

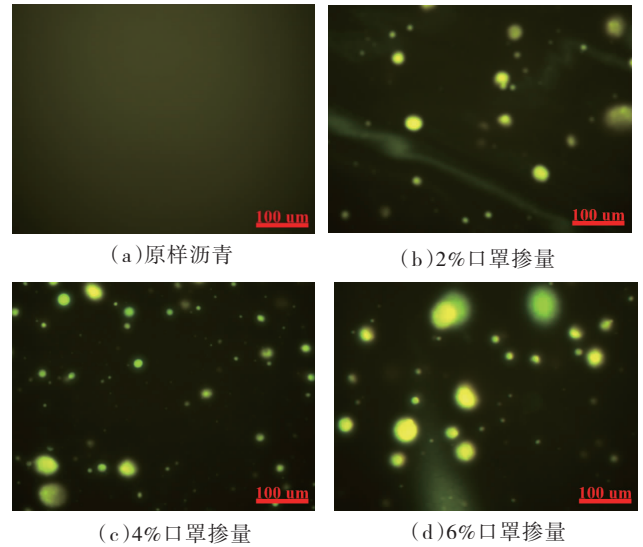


图10 微观形貌

3 结语

(1)废弃口罩的三层材料均为聚丙烯高分子材料。当将口罩破碎料添加入基质沥青后,未观察到明显的化学反应,口罩碎片的加入不会影响被改性沥青的化学结构,改性主要是一个物理过程。

(2)随着口罩破碎料添加量的增加,沥青的高温性能得到改善,但是沥青的低温蠕变特性却有所劣化。此外,与基质沥青相比,口罩改性沥青在不同应变水平下的疲劳寿命增大,但对应变变化的敏感性增加。

(3)随着口罩添加量的增加,改性沥青的相均匀性变差,改性沥青的相分离趋势愈发显著,口罩的掺入对沥青的存储稳定性存在不利影响,推荐口罩添加量为4%。

参考文献:

- [1] 梁万年,刘民,刘珏,等.我国新型冠状病毒肺炎疫情防控的“动态清零”策略[J].中华医学杂志,2022,102(4):239-242.
- [2] 陈海明,董侠,赵莹,等.废弃一次性医用口罩的回收利用与化学升级再造[J].高分子学报,2020,51(12):1295-1306.
- [3] 胡嘉敏,左剑恶,李頔,等.北京城市河流河水和沉积物中微塑料的组成与分布[J].环境科学,2021,42(11):5275-5283.
- [4] TANG C S, PALEOLOGOS E K, VITONE C, et al. Environmental geotechnics: challenges and opportunities in the post-COVID-19 world[J]. Environmental Geotechnics, 2020, 8(3): 172-192.
- [5] REHMAN Z U, KHALIAD U. Optimization of COVID-19 face mask waste fibers and silica fume as a balanced mechanical ameliorator of fat clay using response surface methodology[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(12): 17001-17016.

